



## Caractérisation d'une surface sélective en fréquence cylindrique

Halim Boutayeb, Kouroch Mahdjoubi, Anne-Claude Tarot

### ► To cite this version:

Halim Boutayeb, Kouroch Mahdjoubi, Anne-Claude Tarot. Caractérisation d'une surface sélective en fréquence cylindrique. 2003, 4 p. hal-00133825

**HAL Id: hal-00133825**

**<https://hal.science/hal-00133825>**

Submitted on 27 Feb 2007

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# CARACTERISATION D'UNE SURFACE SELECTIVE EN FREQUENCE CYLINDRIQUE

H. BOUTAYEB, K. MAHDJOUBI et A.C. TAROT

IETR - Institut d'Electronique et de Télécommunications de Rennes, Université de Rennes 1, Bât. 11 D, Campus de Beaulieu, 35042 Rennes - France. [Halim.boutayeb@univ-rennes1.fr](mailto:Halim.boutayeb@univ-rennes1.fr) Tel : +33 (0) 2 23 23 62 35

## I. Introduction

A l'origine, la technologie des Surfaces Sélectives en Fréquences (SSF, en anglais Frequency Selective Surfaces, FSS) faisait partie du domaine militaire. Aujourd'hui, les FSS ont trouvé de nombreuses applications en électromagnétisme, micro-ondes, antennes, radar, et communications par satellite. Une étude détaillée de ces structures est proposée dans [1]. En général leur analyse est faite pour des surfaces planes. Ici, nous nous intéressons aux Surfaces Sélectives en Fréquence Cylindriques SSFC, dans le but de les associer avec des antennes.

Dans [2], l'auteur fait l'étude d'une ligne de courant placée au centre d'une cavité cylindrique constituée de patchs à périodicité cylindrique, mais les caractéristiques (coefficients de réflexion et de transmission ( $r, t$ )) de la surface elle-même ne sont pas données. En effet, le calcul du champ total ne permet pas d'obtenir directement ces caractéristiques : une onde cylindrique illuminant la surface cylindrique donne deux ondes cylindriques, l'une transmise à l'extérieur et l'autre réfléchie vers le centre. Il existe alors des réflexions multiples entre le centre et la surface périodique d'une manière similaire à la cavité de l'interféromètre de Fabry-Pérot, qui se compose de deux surfaces planes. Il faut donc connaître les formules analytiques décrivant ces réflexions à l'intérieur et à l'extérieur de la cavité pour pouvoir extraire les coefficients ( $r, t$ ) de la surface. Ces formules n'étant pas données dans la littérature, nous les développons dans cette présente communication. Le champ total est ici calculé par FDTD.

Les formules décrivant les réflexions multiples sont développées dans la partie II. Elle sont utilisées dans la partie III pour extraire les coefficients de transmission et de réflexion ( $r, t$ ) de la surface cylindrique. La partie IV traite l'exemple d'une surface composée de tiges métalliques. Enfin, dans la partie V, on étudie la structure à plusieurs couches de surfaces cylindriques disposées périodiquement selon une période radiale.

## II. Expression des coefficients de transmission et de réflexion totales d'une onde cylindrique dans une cavité cylindrique

On considère la structure représentée sur la *Figure 1* : une source est placée au centre d'une cavité cylindrique.  $C$  est le rayon du cylindre. ( $r = |r| \exp(j\varphi_r)$ ,  $t$ ) sont les coefficients complexes de réflexion et de transmission de la surface cylindrique.  $r_a$  est le coefficient de réflexion au niveau de la source.

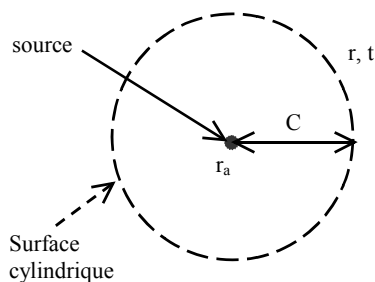


Figure 1 : Source dans une cavité constituée d'une Surface Sélective en Fréquence Cylindrique

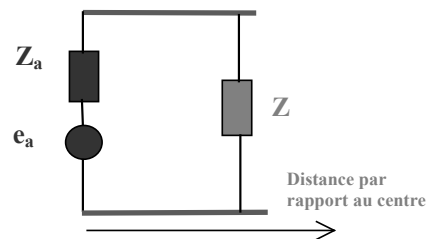
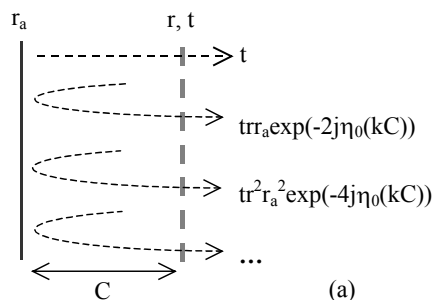
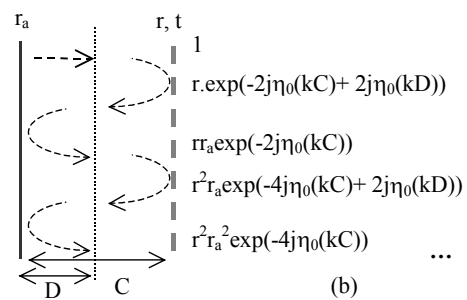


Figure 2 : Modèle de ligne de transmission équivalent



(a)



(b)

Figures 3 : (a) : Termes du coefficient de transmission "totale"  $T$  (b) : Termes du coefficient de réflexion "totale"  $R$  à une distance  $D$  du centre

De la même manière que dans une cavité Fabry-Pérot [3], des réflexions multiples ont lieu dans la cavité cylindrique (*Figure 3a*). Le coefficient de transmission s'écrit, en sommant à l'infini les ondes sortantes de la cavité, c'est à dire les termes de la *Figure 3a* :

$$T = t \sum_{n=0}^{+\infty} r^n r_a^n \exp(-jn2\eta_0(kC)) = \frac{t}{1 - rr_a \exp(-j2\eta_0(kC))}, \text{ où } \eta_0(kC) = \arctan\left(\frac{N_0(kC)}{J_0(kC)}\right) \quad (1)$$

$J_0(x)$  et  $N_0(x)$  sont respectivement les fonctions de Bessel d'ordre 0 de première et deuxième espèce,  $k=2\pi/\lambda$  et  $\eta_0(kC)$  exprime le déphasage dû à la propagation de l'onde cylindrique.

Les résonances (lorsque toutes les ondes sortantes sont en phase) sont données par :

$$2\eta_0(kC) = \varphi_r + \varphi_{r_a} + 2n\pi, \quad n=0, 1, \dots \quad (2)$$

De la même manière on peut obtenir l'expression de l'onde totale réfléchie, à la distance D du centre en fonction de (r, t) et  $r_a$  (*Figure 3b*) :

$$R = (1 + r \exp(-j2\eta_0(kC)) \exp(j2\eta_0(kD))) \sum_{n=0}^{+\infty} r^n r_a^n \exp(-jn2\eta_0(kC)) = \frac{1 + r \exp(-j2\eta_0(kC)) \exp(j2\eta_0(kD))}{1 - rr_a \exp(-j2\eta_0(kC))} \quad (3)$$

Si la source est une ligne de courant idéale alors  $r_a=1$  (source n'interagissant pas avec les ondes).

### III. Calcul des caractéristiques de la Surface Sélective en Fréquence Cylindrique

Le calcul par FDTD nous permet d'obtenir les coefficients T et R de la structure. Nous utilisons les relations (1) et (2) pour en déduire les coefficients (r, t) :

$$r = \frac{R - 1}{(r_a R + B_2) B_1}, \quad t = T(1 - rr_a B_1) \quad (4)$$

avec

$$B_1 = \exp(-2j\eta_0(kC)), \quad B_2 = \exp(2j\eta_0(kD)) \quad (5)$$

### IV. Surface Sélective en Fréquence Cylindrique constituée de tiges métalliques

Pour réaliser la SSFC, on utilise des tiges métalliques infinies.  $a$  est le diamètre des tiges.  $P_\theta$  la période angulaire (en radian),  $P_t$  la période transversale, qui s'écrit en fonction de la période angulaire et du rayon :  $P_t = P_\theta * C$ .

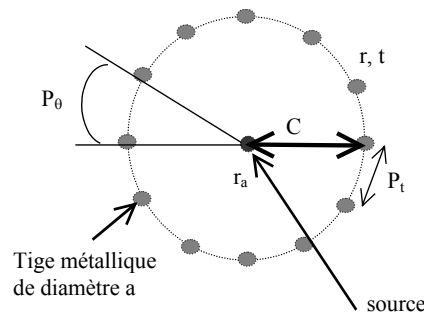


Figure 4 : Surface Sélective en Fréquence Cylindrique constituée de tiges métalliques

On considère l'exemple suivant :  $C=200\text{mm}$ ,  $a=2\text{mm}$ ,  $P_\theta=30^\circ$  et  $P_t=200\text{mm}*\pi/6 \approx 105\text{mm}$ . Nous avons tracé dans la *Figure 5* le module de T en fonction de la fréquence normalisée  $P_t/\lambda$ , ainsi que les modules de (r, t) obtenus avec les équations (4) et (5).

Le module de T peut dépasser 1 (*Figure 5*) bien que la condition de conservation d'énergie  $|r|^2 + |t|^2 = 1$  s'applique. Ce dépassement de 1 ne doit pas être pris comme un gain mais juste comme une adaptation de la source due au couplage entre la source et la surface cylindrique. En théorie, on peut extraire d'une source de courant idéale une énergie infinie. La puissance délivrée par la source dépend des caractéristiques de la surfaces cylindriques et du rayon C. La même observation est faite pour une source à onde plane à l'intérieur d'une cavité Fabry-Pérot [2]. La *Figure 2* donne le modèle de ligne de transmission (non uniforme [3]) équivalent de la structure.  $Z_a$  est l'impédance de la source vue par

l'espace.  $e_a$  est le générateur de tension de la source. Dans le cas de la ligne de courant idéale  $Z_a = \infty$ .  $Z$  est l'impédance de la SSFC. Si la source est adaptée ( $r_a = 0$ ),  $|T| = |t| < 1$  et il n'y a pas de réflexions multiples.

Une onde émise par la source centrale donne naissance à des ondes cylindriques transmises et réfléchies à condition de vérifier l'équivalent cylindrique de non présence de lobes de réseaux dans le cas plan. A posteriori, dans le cas cylindrique, il faut que la période transversale soit inférieure à  $\lambda/2$ . Il faut également que le point d'observation soit à une distance d'une période transversale de la surface, comme dans le cas plan [5].

Sur la Figure 6 nous avons tracé la phase du coefficient de réflexion  $\phi_r$  de la surface cylindrique et la fonction  $2\eta_0(kC)$  : on vérifie que les points d'intersection de ces deux courbes correspondent aux pics de transmission de  $|T|$ . Nous avons également vérifié la condition de continuité  $t=r+1$ .

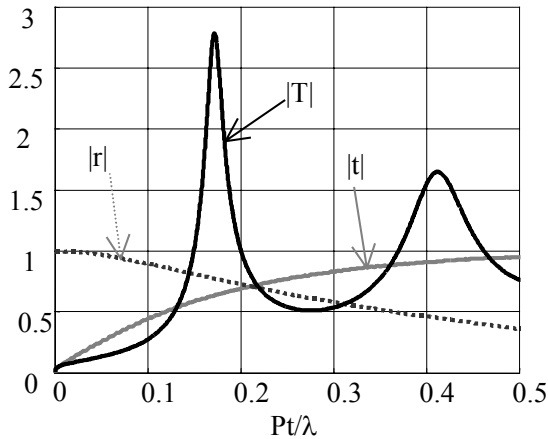


Figure 5 : Module du coefficient de transmission de la cavité, et modules des coefficients de réflexion et de transmission de la surface cylindrique constituée de tiges métalliques ( $a=2\text{mm}$ ,  $P_\theta=30^\circ$ ,  $P_t=200\text{mm} \cdot \pi/6 \approx 105\text{mm}$ )

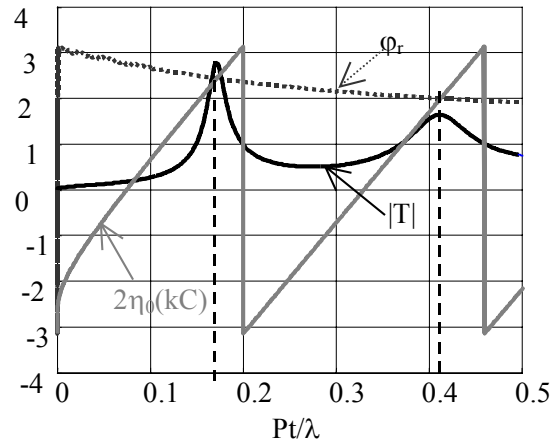


Figure 6 : Confirmation que les points d'intersections de  $\phi_r$  et  $2\eta_0(kC)$  correspondent aux pics de  $|T|$  ( $a=2\text{mm}$ ,  $P_\theta=30^\circ$ ,  $P_t=200\text{mm} \cdot \pi/6 \approx 105\text{mm}$ )

## V. Structure multicouches

Considérons une SSFC de tiges métalliques et faisons varier le rayon  $C$ . On remarque que les caractéristiques de la surfaces restent quasiment inchangées si la période transversale  $P_t$  est maintenue constante et si  $C$  est suffisamment grand (Figure 7). Pour garder  $P_t$  constant, la période angulaire  $P_\theta$  est modifiée de manière adéquate.

La Figure 8 présente la configuration d'une structure à plusieurs couches, ou les couches sont disposées périodiquement avec la période radiale  $P_r$ .  $C_1$  est le rayon de la première couche que l'on prendra dans un premier temps égale à  $P_r$ .

Sur la Figure 9, on trace les modules des coefficients de transmission totale pour différents nombres de couche (résultats FDTD). La période transversale est maintenue constante pour conserver les caractéristiques de la surface cylindrique. On remarque que, comme dans le cas plan, le nombre de pics du coefficient de transmission totale correspond au nombre de cavités.

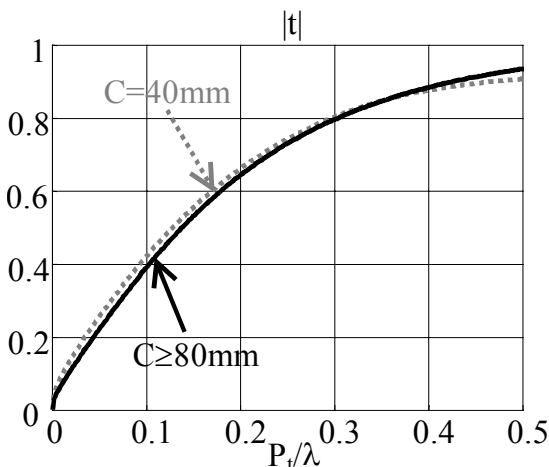


Figure 7 : Module de  $t$  pour une structure périodique de tiges métalliques pour différentes valeurs de  $C$ , ( $a=1\text{mm}$ ,  $P_t=\pi/6 \cdot 40\text{mm}$  constant).

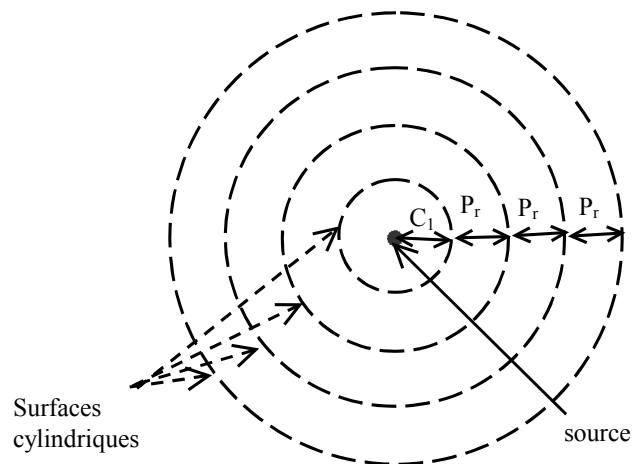


Figure 8 : Structure périodique cylindrique multicouches

En utilisant le model de ligne de transmission de la structure cylindrique périodique, il est facile de montrer [6] que l'équation de dispersion de la structure infinie sans perte est approximativement identique à l'équation de dispersion sans perte du cas plan [7] :

$$\cos(\beta P_r) = \cos(k P_r) + j \frac{y}{2} \sin(k P_r) \quad (6)$$

$\beta$  est la constante de propagation dans la structure périodique,  $k$  le nombre d'onde et  $y=2(1-t)/t$ , l'admittance équivalente normalisée de la SSFC. L'équation de dispersion dépend donc de la période radiale  $P_r$  et du coefficient de transmission  $t$  de la surface (toutes les surfaces sont quasi-identiques car  $P_t$  est constant).  $t$  est obtenue à l'aide des équations (4) et du champ total

Sur la Figure 10, nous avons tracé le module de  $M=\cos(k P_r)+j y/2 \sin(k P_r)$ , le module du coefficient de réflexion d'une structure à six couches  $|r_6|$  et  $\beta P_r$ . Une bande interdite (correspondant à  $|r_6|$  proche de 1) apparaît pour  $|M|>1$  (pas de solution réelle pour  $\beta$ ).

Si  $C$  est pris différent de  $P_r$  un pic de transmission peut être créé dans la bande interdite [6].

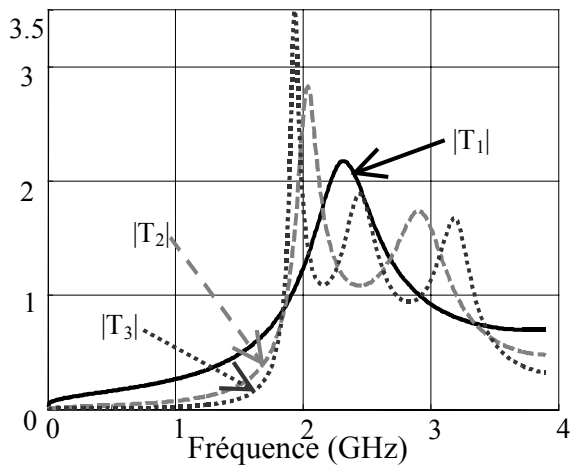


Figure 9 : Modules des coefficients de transmission totale  $|T_i|$  pour des structures cylindriques périodiques à  $i=1, 2$  et 3 couches avec  $P_t$  constant ( $C_1=P_r=40\text{mm}$ ,  $a=1\text{mm}$ ,  $P_\theta=60^\circ/i$ ,  $i=1,2,\dots$ ,  $P_t=40\text{mm}*\pi/3\approx 41.9\text{mm}$ )

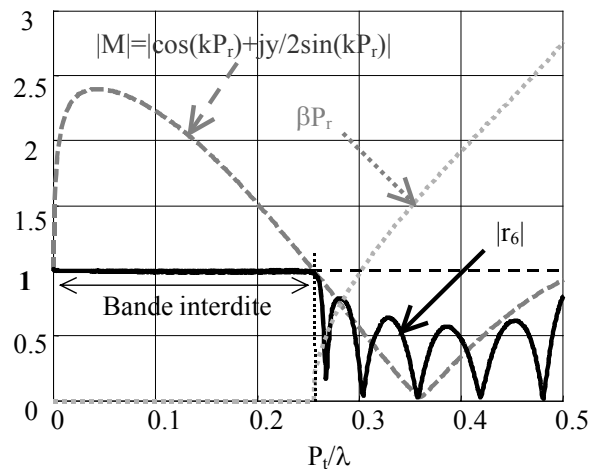


Figure 10 : Structure périodique à six couches, coefficient de réflexion et module de  $M$  (6). ( $a=1\text{mm}$ ,  $P_r=C_1=40\text{mm}$ ,  $P_\theta=60^\circ/i$  ( $i=1,2,\dots$ ),  $P_t$  constant)

## VI. Conclusion

Le calcul du champ total pour une onde cylindrique à l'intérieur d'une surface cylindrique ne permet pas d'obtenir directement les caractéristiques  $(r, t)$  de la surface cylindrique. En s'inspirant de la cavité de l'interféromètre de Fabry-Pérot, des formules permettant de les déduire à partir du champ total ont été données. La SSFC garde ses caractéristiques inchangées si la période transversale  $P_t$  est fixe et si le rayon  $C$  est suffisamment grand. L'équation de dispersion de la structure infinie est approximativement l'équation de dispersion du cas plan et est obtenue grâce à la caractérisation d'une seule couche.

Cette étude peut être utilisée pour réaliser des Surfaces Haute Impédance où la structure cylindrique possède l'avantage de l'isotropie angulaire, des filtres ou des réflecteurs cylindriques.

## Références

- [1] B. A. MUNK, "Frequency Selective Surfaces : Theory and Design", Wiley-Interscience Publication, 2000.
- [2] T. CWICK, "Coupling into and scattering from cylindrical structures covered periodically with metallic patches", IEEE Transaction on Antennas and Propagation, Vol.38, No. 2. February 1990
- [3] H. BOUTAYEB, K. MAHDJOUBI, A.C TAROT, "Antenna inside PBG and Fabry-Perot cavities", Journées Internationales de Nice sur les Antennes, JINA, Nice, France, novembre 2002.
- [4] N. MARCUVITZ, "Waveguide Handbook", McGraw-Hill Company, pp. 29-47: non-uniform radial waveguides, 1951.
- [5] H. BOUTAYEB, K. MAHDJOUBI, A.C TAROT, "Problème de caractérisation des matériaux à BIP de taille fini", JCMM, Toulouse, France, mars 2002
- [6] H. BOUTAYEB, K. MAHDJOUBI, A.C TAROT, "Analysis of radius periodic cylindrical structures", APS/URSI International Symposium, Columbus, Ohio, USA, Juin 2003, accepté
- [7] D.M. POZAR, "Microwave Engineering", Addison Wesley, pp. 458, 1993